دانشکده مهندسی علوم آب
گروه سازه‌های آبی

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

بررسی ناهمگنی زبری کف و دیواره بر توزیع تنش برشی مرزی در کانال های ذوزنقه ای

نگارش:
سمیه رحیمی

استاد راهنما :
دکتر منوچهر فتحی مقدم

استاد مشاور:
دکتر محمود بینا

شهریور ماه ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم
كلك ١٤١٧

تمام سپاس از آن او که غیر از او هیچ کس را صدا نمی کنم. گیرم که دیگران را صدا می کردم، پاسخم را نمی دادند.

تمام سپاس از آن او که دلم به هیچ کس غیر او خوش نیست. گیرم که به دیگران دل خوش می-کردم، ناامیدم می کردند.

تمام سپاس از آن او که تمام کارهایم را خودش رو به راه می کند و پیش او عزیزم. گیرم که امورم را وامی گذاشت به این مردم، خوارم می کردند.

تمام سپاس از آن او که به من نیازی نداشت ولی به من گفت که: دوستم دارد.

تمام سپاس از آن او که جوری با من صبوری می کند که گویی هیچ کار سیاهی نکرده ام.

پروردگار من، بهترین است. شایسته ترین برای سپاس.

ترجمه پاره ای از دعای ابوحمزه ثمالی

تقدیم به:

پدرم

که تصویر اراده‌اش در آیینه می‌درخشد

مادرم

که تکیه‌گاه مهر است و پشتوانه محبت

و خواهرم

که نسیم لطافتش را از او می‌گیرد

تشکر و قدردانی

اینک که در پرتوی الطاف بی کران خداوند منان نگارش این پایان نامه به پایان رسید بر خود واجب می‌دانم که از کلیه عزیزانی که من را در انجام این تحقیق یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم .

با سپاس از زحمات فراوان پدرو مادر بزرگوارم که در راه تحصیل من از هیچ کوششی دریغ ننمودند.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر منوچهر فتحی مقدم به پاس راهنمایی‌ها و زحمات بی دریغشان کمال تشکر و سپاس را دارم.

از جناب آقای دکتر محمود بینا که زحمت مشاوره طرح را بر عهده داشتند صمیمانه تشکر می‌نمایم.

از جناب آقایان دکتر محمود شفاعی بجستان و دکتر سید حبیب موسوی که زحمت داوری طرح را پذیرفتند کمال تشکر و سپاس را دارم.

از دانشگاه شهید چمران به پاس فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی تشکر می‌نمایم.

سمیه رحیمی

شهریور ماه ۱۳۸۹

نام خانوادگی: رحیمی	**نام**: سمیه
عنوان پایان نامه: بررسی ناهمگنی زبری کف و دیواره بر توزیع تنش برشی مرزی در کانال های ذوزنقه‌ای	
استاد راهنما: دکتر منوچهر فتحی مقدم	**استاد مشاور**: دکتر محمود بینا
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	**گرایش**: سازه های آبی
محل تحصیل: دانشگاه شهید چمران اهواز	**دانشکده**: مهندسی علوم آب
تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۸۹ /۶/۳۰	**تعداد صفحات**:۱۱۸
واژه های کلیدی: جریان در کانال‌های باز، نسبت ظاهری، تنش برشی مرزی، نیروی برشی، لوله پرستون.	

چکیده :

تنش برشی یکی از مهمترین پارامترها را در جریان کانال‌های باز به خود اختصاص می‌دهد . به گونه‌ای که اهمیت این پارامتر در اکثر مطالعات جریان در کانال‌های روباز از جمله مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان، انتقال رسوب، پراکندگی، مطالعات تلاطم یا مسائل کاویتاسیون بر کسی پوشیده نیست. از سوی دیگر آنالیز تنش برشی و توزیع آن توسط روش‌های تئوریکی بسیار مشکل است . تأثیر جریان‌های ثانویه ، شکل مقطع و توزیع غیریکنواخت زبری در محیط خیس شده ، تخمین مناسب تنش برشی توسط روش‌های تئوریکی ،تحلیلی را حتی برای مقاطع ساده غیر ممکن ساخته است. بنابراین تحقیقات معتبر در این مورد به موارد آزمایشگاهی و روشهای تجربی محدود می‌گردد.

چندین سری آزمایش در یک کانال باز ذوزنقه‌ای با زبری مرزی یکنواخت و غیر همگن در شرایط جریان یکنواخت ،ماندگار و کاملا توسعه یافته انجام گرفت. به جهت زبر نمودن مرزها (یعنی فقط جداره-ها ،فقط بستر و بستر و جداره-ها) و فراهم آوردن نسبت‌های متفاوت K_{sw}/K_{sb} از سه نوع مصالح دانه بندی شده با متوسط قطر $D_{50}=1.12\,mm$ ، $D_{50}=3.55\ mm$ و $D_{50}=12.57\ mm$ استفاده گردید. در تحقیق حاضر توزیع تنش برشی مرزی ، نیروی برشی ، متوسط تنش برشی جداره و بستر مورد مطالعه قرار گرفت. جهت تعیین تغییرات تنش برشی موضعی از لوله پرستون با قطر خارجی ۴ میلیمتر مجهز به سلول‌های حساس به فشار دینامیک استفاده گردید. جهت تبدیل تفاضل فشار قرائت شده به تنش برشی از منحنی کالیبراسیون پتل استفاده گردیده است.

در کانال-های صاف و زبر یکنواخت به منظور تعیین درصد نیروی برشی کل وارد بر جداره‌ها $\%SF_w$ معادله‌ای تجربی به صورت تابعی از هندسه کانال یعنی نسبت ظاهری B/H به دست آمد. برای کانال-های ذوزنقه‌ای با زبری غیر همگن معادله-ای مشابه با به کار بردن نسبت K_{sw}/K_{sb} به عنوان نماینده تنش-های حاصل از غیر همگنی زبری مرزی کانال پیشنهاد گردید. همچنین معادلاتی به منظور تخمین متوسط تنش برشی جداره و بستر در کانال-های ذوزنقه‌ای صاف بر مبنای درصد نیروی برشی کل وارد بر جداره-ها $\%SF_w$ و ژئومتری کانال یعنی نسبت B/H ارائه گردید.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل۱ مقدمه ۱

۱-۱. مقدمه ۲

۱-۲. اهمیت مسئله ۲

۱-۳. اهداف ۴

۱-۴. روش کار ۴

۱-۵. ساختار پایان نامه ۶

فصل۲ مروری بر منابع ۷

۲-۱. مقدمه ۸

۲-۲. مروری بر تحقیقات گذشته ۸

۲-۲-۱. بررسی گزارشهای علمی منتشر شده ۸

۲-۲-۲. مطالعات انشتین ۱۱

۲-۲-۳. مطالعات ونونی و بروکس ۱۴

۲-۲-۴. مطالعات هوانگ و لارسن ۱۵

۲-۲-۵. مطالعات ویلیامز ۱۶

۲-۲-۶. مطالعات کارتا و لئوفیسر ۱۶

۲-۲-۷. مطالعات گاش ۱۷

۲-۲-۸. مطالعات نایت ۱۹

۲-۲-۹. مطالعات نایت و همکاران ۲۰

۲-۲-۱۰. مطالعات وو و راجاتنام ۲۱

۲-۲-۱۱. مطالعات یانگ و لیم ۲۲

۲-۲-۱۲. کریشنپن و انگل ۲۶

۲-۲-۱۳. مطالعات گو و جولین ۲۷

۲-۲-۱۴. لشکرآرا و همکاران ۲۹

۲-۳. بررسی گزارشهای علمی در خصوص اندازه گیری تنش برشی با لوله پرستون ۳۰

۲-۳-۱. مطالعات پرستون ۳۰
2-3-2. مطالعات پتل ۳۲
2-3-3. مطالعات برترالد ۳۵
2-3-4. مطالعات کساب ۳۵
2-3-5. مطالعات بچرت ۳۶
2-3-6. مطالعات رودز و نو ۳۷
2-3-7. سوتردی و چنگ ۳۸

فصل۳ تئوری تحقیق **۳۹**

۳-۱. مقدمه ۴۰
۳-۲. معادلات پایه ۴۰
۳-۳. مفهوم لایه مرزی ۴۵
۳-۴. توزیع تنش برشی ۴۹
۳-۵. معادلات متوسط تنش برشی بستر و جداره در سطوح صاف ۵۰
۳-۵-۱. معادله متوسط تنش برشی بستر ۵۲
۳-۵-۲. معادله متوسط تنش برشی جداره ۵۵
۳-۵-۳. روش تحلیلی در حالت جریان ثانویه ناچیز ۵۶
۳-۵-۴. روش تحلیلی با معرفی فاکتورهای تصحیح ۶۰
۳-۶. روشهای اندازه گیری تنش برشی ۶۳
۳-۶-۱. اندازه گیری تنش با استفاده از پروفیل سرعت ۶۴
۳-۶-۲. استفاده از شیب خط انرژی ۶۶
۳-۶-۳. اندازه گیری تنش با استفاده از تکنیک انرژی جنبشی آشفته TKE ۶۶
۳-۶-۴. روش انتقال جرم و حرارت ۶۹
۳-۶-۵. اندازه گیری تنش با استفاده از حسگر شناورFES ۷۱
۳-۶-۶. اندازه گیری تنش با استفاده از نیروی دراگ و جذب ممنتم ۷۱
۳-۷. بسط مدل به کمک آنالیز ابعادی ۷۲
۳-۷-۱. آنالیز ابعادی تنش برشی جداره و کف در مجاری ذوزنقهای ۷۳
۳-۸. آنالیز ابعادی برای پرستون تیوپ: ۷۶

فصل۴ مواد و روش‌ها **۷۹**

۴-۱. مقدمه ۸۰
4-2. خصوصیات مدل فیزیکی و انجام آزمایشات ۸۰
۴-۳. تجهیزات اندازه گیری ۸۱
۴-۳-۱. اندازه گیری سرعت جریان ۸۱
۴-۳-۲. اندازه گیری تنش ۸۲
۴-۳-۳. اندازه گیری تراز سطح آب ۸۳

۴-۳-۴. اندازه گیری فشار دینامیک.....۸۴
۴-۳-۵. اندازه گیری دبی.....۸۵
۴-۴. خطاهای اندازه گیری در مدل.....۸۵
۴-۴-۱. خطا در قرائت رقوم سطح آب و عمق جریان.....۸۶
۴-۴-۲. خطای اندازه گیری سرعت.....۸۶
۴-۴-۳. خطای اندازه گیری دبی جریان.....۸۶
۴-۴-۴. خطای اندازه گیری فشار دینامیکی.....۸۶

فصل۵ تحلیل نتایج **۸۸**

۵-۱. مقدمه.....۸۹
۵-۲. نتایج آزمایشگاهی اندازه گیری تنش برشی مرزی در بستر صاف.....۸۹
۵-۳. اندازه گیری تنش برشی مرزی در بستر زبر.....۹۱
۵-۳-۱. نتایج آزمایشگاهی اندازه گیری تنش برشی مرزی در بستر زبر.....۹۲
5-4. تعیین تنش برشی در بستر و جداره کانال‌های ذوزنقه ای صاف.....۱۰۰
5-5. تعیین تنش برشی در بستر و جداره کانال‌های ذوزنقه ای زبر.....۱۰۳

فصل۶ نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات **۱۱۱**

۶-۱. نتیجه گیری.....۱۱۲
۶-۲. پیشنهادات.....۱۱۴

مراجع **۱۱۵**

فصل ۱

مقدمه

۱-۱. مقدمه

جریان سیالات همواره با مقاومت در برابر جریان و کاهش انرژی مواجه بوده است. تاریخچه تحقیقات انجام شده در رابطه با مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان، به قرن چهارم قبل از میلاد و کشور یونان باز می گردد. دانشمندانی نظیر شزی[۱]، گانگیلت- کاتر[۲]، و مانینگ[۳] تحقیقات گسترده‌ای را در رابطه با مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان انجام دادند. مفهوم مقاومت جریان به صورت عملی‌تر توسط راس[۴] مورد بررسی قرار گرفت.

بحث تئوریک مقاومت جریان، برخاسته از قوانین مقاومت برای لایه‌های مرزی و کاربرد موفق آن در جریان لوله‌ها می‌باشد. در جریان کانال‌ها، اصطکاک در مرز، از لایه برشی که شباهت‌های زیادی به لایه مرزی دارد شکل گرفته است. بنابراین معادلات مقاومت کانال متمایل به مبانی تئوری لایه مرزی می‌باشند. در واقع این تئوری بدون اصلاح و تعدیل در کانال‌های باز قابل کاربرد نمی‌باشد، اما کاربرد اصولی این تئوری، اطلاعات سودمندی را در توسعه تئوریکی مقاومت جریان کانال‌ها فراهم می‌کند.

۱-۲. اهمیت مسئله

جریان در روی بستر مجاری روباز، نیروئی را به بستر اعمال می‌کند و بستر طبق قانون عمل و عکس العمل نیوتن، نیروی مساوی و مخالف را به جریان اعمال می‌کند، که به نام نیروی برشی یا

---

[1] -Chezy (1769)
[2] -Ganguillete-Kutter (1869)
[3] -Manning (1891)
[4] -Rouse (1965)

نیروی کششی[1] معروف است. مقدار متوسط نیروی کششی در واحد سطح محیط خیس شده را تنش برشی می‌نامند.

تنش برشی یکی از مهمترین پارامترها را در جریان کانال‌های باز به خود اختصاص می‌دهد . به گونه‌ای که اهمیت این پارامتر در اکثر مطالعات جریان در کانالهای روباز از جمله مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان، انتقال رسوب، پراکندگی[2]، مطالعات تلاطم یا مسائل کاویتاسیون بر کسی پوشیده نیست. از سوی دیگر آنالیز تنش برشی و توزیع آن توسط روش‌های تئوریکی بسیار مشکل است . تأثیر جریان‌های ثانویه ، شکل مقطع و توزیع غیریکنواخت زبری در محیط خیس شده ، تخمین مناسب تنش برشی توسط روش‌های تئوریکی ،تحلیلی را حتی برای مقاطع ساده غیر ممکن ساخته است. بنابراین تحقیقات معتبر در این مورد به موارد آزمایشگاهی و روشهای تجربی محدود می‌گردد.

تفکیک تنش برشی بستر و تنش برشی دیواره از دیگر مسائل پر اهمیت در مطالعات جریان در کانال‌های باز می‌باشد. به عنوان مثال به منظور تخمین انتقال بار بستر در کانال‌های باز، باید بتوان تنش برشی بستر را از تنش برشی کل تفکیک نمود. همچنین در مطالعات مربوط به حفاظت سواحل و جلوگیری از فرسایش دیواره‌ها آگاهی از تنش برشی دیواره امری ضروری است.علاوه بر این در مطالعات آزمایشگاهی پروفیل سرعت، مقاومت ناشی از فرم بستر و انتقال رسوب اثر اصلاحی دیواره جانبی باید مورد بررسی قرار گیرد.

---

[1] -Tractive Force
[2] -Dispersion

۱-۳. اهداف

در مبحث انهار رو باز مقاطع ذوزنقه‌ای شکل به دلیل راحتی اجرا و ظرفیت حمل دبی بالاتر نسبت به کانال‌های مستطیلی ، کاربرد عام‌تری یافته‌اند. همچنین می‌توان بسیاری از انهار طبیعی را به فرم ذوزنقه معادل تعریف نمود به طوری که بیشترین انطباق را از نظرژئومتری بر بستر طبیعی داشته باشند. با مطالعه در رودخانه‌های طبیعی می‌توان دریافت که به دلیل تغییر قدرت حمل رود در یک مقطع عرضی ممکن است اندازه زبری در بستر و دیواره‌ها باهم متفاوت(برای مثال پوشش گیاهی حاشیه رودخانه ها) باشد . از سوی دیگر برای محافظت کانال در مقابل فرسایش ، با توجه به ملاحظات اقتصادی و هیدرولیکی می‌توان اندازه ریپ‌رپ را در بستر و دیواره-ها متفاوت گرفت.

بنابراین ، هدف از تحقیق حاضر تعیین توزیع تنش برشی در جداره‌ها و کف کانال ذوزنقه‌ای در بسترهای صاف و زبر هیدرولیکی می‌باشد.همچنین اثر ناهمگنی زبری کف و دیواره K_{sb}/K_{sw} و تاثیر نسبت ظاهری B/H، بر توزیع تنش برشی مرزی مورد بررسی قرار می-گیرد و معادله‌ای برای تنش برشی متوسط دیوار و بستر ارائه خواهد شد. در نهایت تنش برشی به دست آمده توسط روش پرستون با تنش برشی متوسط که بر اساس شیب سطح آب و رابطه انرژی به دست می‌آید مقایسه خواهد شد.

۱-۴. روش کار

آزمایش های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه مدل واقع در دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام می‌گیرد. آزمایشات درون یک فلوم مستطیلی شکل با عرض خالص ۰/۸ متر ،عمق ۰/۵۵ متر و طول ۸/۳ متر شامل ۴/۱ متر کانال بالادست، یک متر محدوده

اندازه گیری و ۳/۲ متر کانال پایین دست انجام گرفته است. جنس فلوم از آهن بوده و جداره ها از صفحات پلاکس گلاس پوشانده شده‌اند. شیب فلوم ثابت می باشد. به منظور کنترل رقوم پایاب و ایجاد شرایط جریان یکنواخت و تنظیم عمق کانال در دبی‌های مختلف یک دریچه در انتهای فلوم پیش بینی گردید. مقطع مستطیلی شکل فلوم با نصب دیوار جانبی شکل ذوزنقه ای به خود گرفته است، که این مقطع ذوزنقه‌ای دارای عرض بستر ۰/۲ متر ، و زاویه جانبی ۴۵ درجه می‌باشد. با استفاده از سه الگو متفاوت زبری، کف و دیواره کانال زبر می‌گردد.

جریان آب از طریق موتور پمپ به تانکی ریخته می شود و از آنجا پس از عبور از صفحات مشبک که برای آرام کردن جریان تعبیه شده است، وارد فلوم می شود.

دبی عبوری از کانال با استفاده از یک عدد سرریز مستطیلی که در پایین دست کانال نصب گردیده است کنترل گردید. سرریز مذکور توسط موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو کالیبره شده است. جهت برداشت رقوم ارتفاعی سطح آب در امتداد طولی و عرضی مدل از اشل میله ای[1] دیجیتال استفاده گردید. جهت تعیین تغییرات تنش برشی موضعی، از لوله پرستون[2] با قطر خارجی ۴ میلیمتر که به سلول‌های حساس به فشار دینامیک[3] مجهز می‌باشد، استفاده گردیده است. سرعت توسط میکرومولینه در نقاط مختلف مقطع مورد مطالعه اندازه گیری شد. نتایج اندازه گیری میکرومولینه با استفاده از دبی اندازه گیری شده روی سرریز کانال خروجی و رابطه پیوستگی مقایسه گردید.

[1] -Point Gauge
[2] -Preston Tube
[3] -Transducer

۱-۵. ساختار پایان نامه

در فصل اول صرفاً به بیان تعریف و اهمیت مسئله پرداخته می‌شود. و شمای کلی از روش کار جهت رسیدن به اهداف ذکر شده ارائه می‌گردد.

فصل دوم به مروری بر منابع و گزارشهای علمی منتشر شده اختصاص یافته است. معادلات تجربی، تحلیلی و نیمه تحلیلی ارائه شده در مورد تنش برشی و همچنین معادلات ارائه شده برای کالیبراسیون پرستون تیوپ در این فصل مورد بررسی قرار می گیرد.

فصل سوم با عنوان تئوری تحقیق به مروری بر مباحث هیدرومکانیکی مرتبط با تنش برشی، و معرفی روشهای اندازه گیری تنش برشی می‌پردازد در ادامه این فصل جهت تعیین تنش برشی برای کانال ذوزنقه‌ای اقدام به آنالیز ابعادی می‌گردد. .همچنین آنالیز ابعادی برای تعیین پارامترهای موثر بر اندازه گیری تنش برشی بوسیله پرستون تیوپ ارائه می شود.

فصل چهارم با عنوان مواد و روشها به شرح مدل فیزیکی مورد استفاده و تجهیزات اندازه گیری سرعت جریان، فشار، دبی و عمق جریان می پردازد. همچنین در این فصل مراحل و نحوه آزمایشات انجام شده تشریح می‌گردد

فصل پنجم به ارائه نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش برشی مرزی در کانال‌های ذوزنقه‌ای در شرایط بستر صاف و زبر هیدرولیکی اختصاص دارد.

فصل ششم شامل خلاصه مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق و ارائه پیشنهادات کاربردی جهت تحقیقات آینده می‌باشد.

فصل ۲

مروری بر منابع

۲-۱. مقدمه

در اکثر مطالعات جریان در کانالهای روباز از جمله مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان، انتقال رسوب، پراکندگی[1] یا مسائل کاویتاسیون تعیین تنش برشی مرزی دارای اهمیت است. توزیع تنش برشی در اطراف محیط خیس شده یک کانال روباز به شکل مقطع عرضی، ساختار جریان ثانویه و غیر یکنواختی زبری وابسته می باشد[23]. تنش برشی و ساختار لایه مرزی درکانالهای روباز و مجاری بسته توسط محققین مختلف اندازه گیری یا تخمین زده شده است. لازم به ذکر است که روابط ارائه شده تاکنون یا به روش تحلیلی و یا به روش اندازه‌گیری غیر مستقیم به دست آمده‌اند و بر اساس شیب سطح آب و رابطه انرژی استوار می‌باشند.

۲-۲. مروری بر تحقیقات گذشته

هدف از این فصل مروری بر منابع و گزارشهای علمی منتشر شده می باشد. معادلات تجربی، تحلیلی و نیمه تحلیلی ارائه شده در مورد تنش برشی و همچنین معادلات ارائه شده برای کالیبراسیون پرستون تیوپ در این فصل مورد بررسی قرار می گیرد.

۲-۲-۱. بررسی گزارشهای علمی منتشر شده

لایلی[2] با استفاده از روش تطبیقی[3] (نگاشت) به مطالعه توزیع تنش برشی مرزی در جریان

[1] -Dispersion
[2] -Leighly (1932)
[3] -Conformal Mapping

کانال‌های روباز پرداخت. بر اساس مطالعات ایشان، در غیاب جریان‌های ثانویه، نقش تنش برشی مرزی در بستر باید با مولفه وزن در راستای جریان متعادل شود.[۱۶].

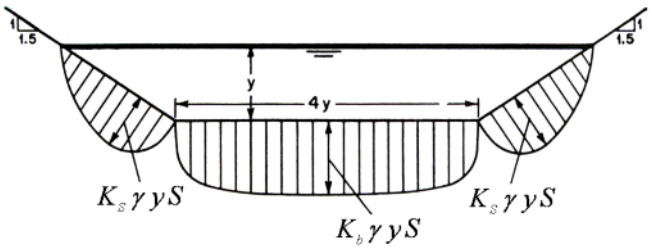
چو و همکاران[1] در سالهای ۱۹۸۳ و ۱۹۸۶ در خصوص اثر متقابل بین جریان‌های اولیه و ثانویه، توزیع تنش برشی، خصوصیات کانال (از جمله زبری، شیب و مشخصات هندسی) و دیگر پارامترهای وابسته در مجاری روباز تحقیقاتی انجام دادند. بر اساس نتایج مطالعات ایشان محاسبه تنش برشی نیازمند اندازه‌گیری دقیق پروفیل سرعت است.

کلیکان[2] و جانسون[3] در اوایل توسعه این موضوع مشارکت داشتند و انشتین[4] روش تفکیک شعاع هیدرولیکی را مطرح کرد که امروزه نیز در سطح وسیعی از آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و مسائل مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۶].

مطالعات دفتر مهندسی عمران امریکا[5] نحوه توزیع تنش برشی را در مقاطع ذوزنقه‌ای، به صورت شکل ۲-۱ ارائه کرده است. طبق تجربیات به عمل آمده توزیع تنش در سطح بدنه کانال بستگی به شکل سطح مقطع داشته ولی اندازه سطح مقطع در نحوه توزیع تنش بی اثر است. در شکل ۲-۲ حداکثر تنش برشی در کف و شیب‌های جانبی کانال‌های ذوزنقه‌ای و مستطیلی با توجه به نسبت b/y که توسط Lane ارائه شده است دیده می‌شود. با توجه به اینکه عمق آب در کف کانال نسبت به شیب‌های جانبی بیشتر است، می‌توان قبول کرد که تنش برشی در کف کانال نسبت به شیب‌های جانبی بیشتر است[۲]. با وجود این تفاوتها و با وجود کامل و کافی نبودن

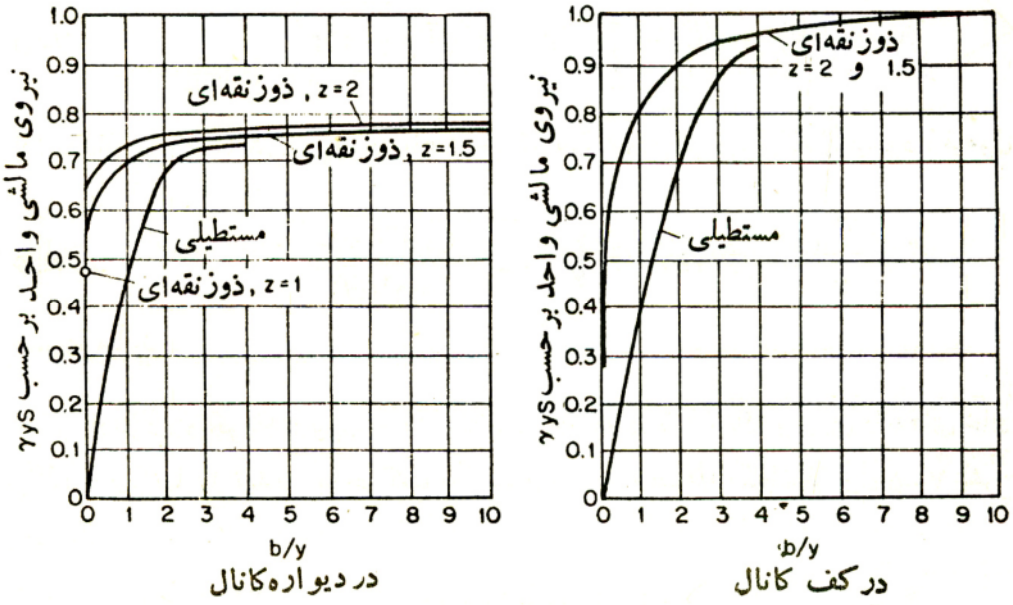
[1] -Chiu and Lin (1983) & Chiu and Chiou (1986)
[2] -Keulegan (1938)
[3] -Johnson (1942)
[4] -Einstin
[5] -USBR(United States Bureau of Reclamation)

اطلاعات در مورد توزیع تنش برشی در مقاطع با شکل‌های مختلف، استفاده از تنش برشی متوسط در مقاطع عرضی جریان موجب سهولت در به دست آوردن فرمول جریان در کانال‌های روباز خواهد شد [۸].



K_s	K_b	B/y
./۷۳۵	./۸۹	۲
./۷۵	./۹۷	۴
./۷۶	./۹۹	۸

شکل۲-۱. توزیع نیروی مالشی در یک کانال ذوزنقه‌ای



شکل۲-۲. حداکثر نیروی مالشی در کف و دیواره بر حسب γyS

از سال ۱۹۶۰ به بعد مطالعات تجربی متعددی توسط جانسون[۱] ، کروف[۲][۱۰] ، گاش و روی[۳][۱۲] ، کارتا و لوتسر[۴] [14] ، گاش ، میرز[۵]، نایت و مک دونالد[۶] ، نایت [19]، نوتوپولوس و هاجی پانوس[۷] ، نایت و همکاران[20]، هو[۸] ، چیو و همکاران[۹]، ویبرگ[۱۰] ، گو و جولین[۱۱][۱۶] ، خداشناس و همکاران،لشکرآرا و همکاران [6] و برخی محققین دیگر گزارش شده است. که در ادامه به تشریح برخی از آنها پرداخته خواهد شد.

۲-۲-۲. مطالعات انشتین[۱۲]

انشتین روش تفکیک شعاع هیدرولیکی را مطرح کرد که امروزه نیز در سطح وسیعی از آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و مسایل مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. انشتین سطح مقطع جریان را به دو ناحیه A_b و A_w تقسیم کرد. این نواحی در شکل ۲-۳ نشان داده شده‌اند.

وی فرض نمود که مولفه وزن در راستای جریان در ناحیه A_b با مقاومت ناشی از بستر متعادل می‌شود. همچنین مولفه وزن آب در راستای جریان در ناحیه A_w با مقاومت ناشی از دو جداره به تعادل می‌رسد. ضمنا انشتین فرض نمود که هیچگونه اصطکاکی در مرز بین سطوح A_b و A_w وجود ندارد. در رابطه انرژی، انرژی پتانسیل ناشی از سطح A_b در کف کانال و انرژی پتانسیل

[1] -Johnson (1942)
[2] -Cruff (1965)
[3] -Gosh and Roy (1970)
[4] -Kartha and Leutheusser (1970)
[5] -Myers (1982)
[6] -Knight and Macdonald (1979)
[7] -Noutsopoulos and Hadjipanos (1982)
[8] -Hu (1985)
[9] -Chiu et al. (1983, 1985)
[10] -Wiberg (1989)
[11] -Guo and Julien (2005)
[12] -Einstein (1942)